

Sonderdruck aus „Gerlands Beiträge zur Geophysik“  
Band 32 (Köppen-Band I), 1931, S. 87—94  
Herausgegeben von V. Conrad, Wien

---

# Aufbau und Temperatur der Stratosphäre

Von

B. Gutenberg

Pasadena (Calif.)

(Mit 3 Figuren)

*Batch Graduate School of the Geological Sciences  
California Institute of Technology  
Pasadena, California*

Contribution No. 56



---

Leipzig  
Akademische Verlagsgesellschaft m. b. H.  
1931

# Aufbau und Temperatur der Stratosphäre.

Von

B. Gutenberg, Pasadena (Calif.).

(Mit 3 Figuren.)

**Summary:** Investigations on the structure of the stratosphere during the last years<sup>1)</sup> have completely changed our view. LINDEMAN-DOBSON<sup>2)</sup> have used observations of meteors to get new results; new results on the temperature of the stratosphere have been calculated considering the layer of ozone<sup>3)</sup>. The spectrum of the aurora polaris<sup>4)</sup> makes it clear that there must be nitrogen in the atmosphere up to heights of some 100 km and also oxygen must be present up to such heights, perhaps in an decreasing amount. No lines of hydrogen or helium have been observed. MARIS<sup>5)</sup> and ERSTEIN<sup>6)</sup> find by calculations that the atmosphere needs very long time to restore diffusion equilibrium if mixed. Finally PETERSEN<sup>7)</sup> has calculated that a gas which originates at the surface of the earth and leaves the atmosphere at the top, possibly according to the theory of JEANS<sup>8)</sup>, must form a considerable smaller fraction of the atmosphere in great heights than in the case of diffusion equilibrium. So we will not have large amounts of Helium or hydrogen at any height.

Using these new results, the theory and the observations of LINDEMAN-DOBSON we can now try to find the best suppositions on the composition of the stratosphere and its temperature. We calculate the density, first assuming these two quantities, and then from the observations concerning meteors. If we have made the right suppositions, the results calculated in both ways must agree, or corresponding to the errors must at least show similar curves, when plotted, with differences not very much exceeding a factor ten.

The figures 1—3 show the results of the investigation. Assuming different amount of hydrogen (fig. 1) the curves either do not agree (1, 2), or the amount of hydrogen is nearly 100% at heights of 100 km. or more, so that we could not get the lines of nitrogen in the spectrum of the aurora, or we find such high temperatures that hydrogen must have escaped from our atmosphere. So we have no hydrogen in the atmosphere, corresponding to the results of MARIS, ERSTEIN and PETERSEN. If we assume helium but no hydrogen (fig. 2), we find agreement between the two curves calculated in different ways only by assuming a rather warm stratosphere (curves 4 of fig. 2). In this case more helium should be generated at the surface of the earth than lost by the current into the interstellar region. It is also not impossible that we have nearly no helium but an slightly increasing amount of water vapor and neon in the higher parts of the stratosphere. Finally figure 3 is calculated with the assumption that there is only nitrogen and oxygen in the stratosphere. In this case the stratosphere should be very hot.

Considering all results it seems to be very probable that the atmosphere has the same composition everywhere between the bottom and a height of at



least 150 km, that at greater heights the amount of oxygen decreases slowly, that the amount of water vapor or helium increases a little at greater heights and that the stratosphere is warm, the temperature being of the order of 500—1000° C.

Die Ergebnisse der neueren Untersuchungen haben die seither üblichen Ansichten über den Aufbau der Stratosphäre, wonach diese kalt und im Diffusionsgleichgewicht ist, wesentlich erschüttert<sup>1)</sup>. Zunächst machten es die Untersuchungen von LINDEMAN und DOBSON<sup>2)</sup> an Meteoren wahrscheinlich, daß die Stratosphäre, abgesehen von den untersten Schichten, mindestens die gleiche Temperatur hat wie wir sie an der Erdoberfläche beobachten. Die Feststellung einer Ozonschicht in 40 km Höhe und die daraus berechneten Temperaturen der Stratosphäre in dieser Höhe<sup>3)</sup> bestätigten dieses Ergebnis. Die anormale Hörbarkeit von Explosionen führte dann zu dem Resultat, daß die Schallgeschwindigkeit in der Stratosphäre in wenigen Zehnern von Kilometern Höhe stark ansteigen müsse, und die Untersuchungen zeigten weiter, daß dies mit der größten Wahrscheinlichkeit durch einen Anstieg der Temperatur bedingt sei. Das Polarlichtspektrum<sup>4)</sup> ließ erkennen, daß in mehreren hundert Kilometern Höhe die Stickstofflinien noch unverändert erzeugt werden, während die grüne Sauerstofflinie anscheinend merklich zurückging. Allerdings besteht die Möglichkeit, daß die Anregungsbedingungen für diese Linie in der Höhe ungünstiger sind. Helium- und Wasserstofflinien wurden nicht festgestellt. Dieses Ergebnis steht im Widerspruch zu den Ergebnissen, die man für den Aufbau der Stratosphäre erhält, wenn man Diffusionsgleichgewicht voraussetzt, das in weniger als etwa 50 km Höhe beginnt, eine kalte Stratosphäre und entweder Wasserstoff oder Helium in der Stratosphäre. Bei Annahme hoher Temperaturen in der Stratosphäre macht sich die prozentuale Zunahme dieser Gase erst in großer Höhe bemerkbar. Ist die Stratosphäre erst einmal durchmischt — und es ist in der Tat sehr wahrscheinlich, daß die Temperaturänderungen zwischen Nacht und Tag eine Art Pulsationen der ganzen Atmosphäre und damit auch Durchmischung hervorrufen —, so dauert es nach den Untersuchungen von MARIS<sup>5)</sup> und unabhängig davon von P. EPSTEIN<sup>6)</sup> in den unteren 100 km der Atmosphäre Jahre, bis bei Fehlen jeder Störung Diffusionsgleichgewicht wieder eintritt, und erst in rund 150 km Höhe sinkt diese Zeit auf 1 Tag. Danach ist es sehr unwahrscheinlich, daß unterhalb dieser Höhe Diffusionsgleichgewicht herrscht. Schließlich warf H. PETERSEN<sup>7)</sup> die Frage auf, was sich ereignet, wenn einerseits ein Gas an der Erdoberfläche erzeugt wird und es andererseits in der Höhe wieder in den



Weltraum ausströmt. In der Tat entströmt in einer Zeit, die sehr klein ist gegenüber dem Alter der Erde, der ganze maximal mögliche Gehalt der Erdatmosphäre an Helium der Erde, und auch beträchtliche Mengen Wasserstoff werden dauernd erzeugt. Es folgt hieraus, daß Helium und vermutlich auch Wasserstoff dauernd die Erdatmosphäre verlassen müssen. PETERSEN setzte voraus, daß sich ein Gleichgewichtszustand ausgebildet hat, d. h., daß unten gerade so viel Helium erzeugt wird wie oben abströmt. Er fand, daß dann das Verhältnis des wirklichen Heliumgehaltes zu dem unter Voraussetzung von Diffusionsgleichgewicht berechneten exponentiell mit der Höhe abnimmt. Der Heliumgehalt und analog der Wasserstoffgehalt würde nirgends einen merklichen Anteil an der Zusammensetzung der Atmosphäre haben. Auch eine Ursache für das vermutliche Abströmen dieser beiden Gase ist uns bekannt: JEANS<sup>8)</sup> hat gezeigt, daß bei einer Stratosphärentemperatur von etwas unter 300° C Wasserstoff und bei etwas unter 1000° C auch Helium nicht von der Erde festgehalten werden können. Selbst letztere Temperatur kann recht wohl in höheren Schichten der Atmosphäre vorhanden sein, wie die oben erwähnten Rechnungen von GOWAN gezeigt haben.

Faßt man alle diese Ergebnisse zusammen, so findet man, daß die Stratosphäre wahrscheinlich recht warm ist, und daß sich ihre Zusammensetzung bis etwa 150 km Höhe nicht wesentlich ändert. Darüber nehmen vielleicht leichte Gase etwas zu, jedoch vermutlich weniger schnell als dem Diffusionsgleichgewicht entspricht, schwerere Gase, insbesondere also auch Sauerstoff, etwas ab. Helium und Wasserstoff kommen anscheinend als wesentliche Bestandteile der Atmosphäre nicht in Frage; die leichtesten Gase wären dann besonders Wasserdampf, der in Höhen über 100 km in beliebigen Mengen vorhanden sein kann, ohne zu kondensieren, und Neon.

Die ersten qualitativen Ergebnisse über den Aufbau der Stratosphäre lieferten, wie erwähnt, die Untersuchungen von LINDEMAN und DOBSON an Meteoriten. Die Theorie enthält eine Reihe von Vereinfachungen und Voraussetzungen, die nur roh zutreffen, die Ergebnisse mögen daher um einen Faktor 10, vielleicht sogar noch etwas mehr, unsicher sein; eine Prüfung der Fehlerquellen zeigt aber, daß diese in verschiedenen Richtungen liegen, sich also teilweise gegenseitig aufheben. Es sei daher im folgenden der Versuch gemacht, die Ergebnisse der Beobachtungen an Meteoriten unter Voraussetzung der Theorie von LINDEMAN-DOBSON unter Verwendung der damals noch unbekannten Ergebnisse über den Aufbau der Stratosphäre zu diskutieren.



Nach LINDEMAN-DOBSON ist die Dichte  $d$  in der Höhe  $h$ , in welcher ein Meteorit auftaucht bzw. verschwindet, gegeben durch

$$(1) \quad d = F M : T k,$$

wo  $F$  ein Faktor ist, der aus beobachteten Größen, die den Meteoriten betreffen, berechnet werden kann, und zwar auf verschiedene Weise beim Auftauchen und Verschwinden,  $M$  das Molekulargewicht des Gases, das an dieser Stelle vorhanden ist, unter normalen Bedingungen,  $k$  ein Faktor, der vom Gas abhängt und für den LINDEMAN-DOBSON Werte berechnet haben, und schließlich  $T$  die absolute Temperatur an der Stelle, an der der Meteorit auftaucht bzw. verschwindet. Aus den Werten für  $d$ , die LINDEMAN und DOBSON unter speziellen Voraussetzungen für  $M$  und  $T$  berechnet und graphisch dargestellt haben, unter Benutzung dieser Werte für  $M$  und  $T$  selbst sowie des entsprechenden  $k$  läßt sich der Faktor  $F$  finden. Tabelle 1 gibt seine Werte. Unbekannt sind zu-

Tabelle 1.

Werte des Faktors  $F$  nach Beobachtungen an Meteoriten nach LINDEMAN-DOBSON.

Höhe	25	50	75	100	125	150	200 km
$F$	$1.5 \cdot 10^{-6}$	$7.5 \cdot 10^{-8}$	$7.5 \cdot 10^{-9}$	$10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$4 \cdot 10^{-10}$	$(2^{1/2} \cdot 10^{-10}?)$

nächst das Gas in der Höhe  $h$  und dessen Temperatur. Macht man Annahmen über beide, so läßt sich nach (1) die Dichte in der Höhe  $h$  finden. Andererseits kann man diese aber auch aus den angenommenen Werten für  $M$  und  $T$  finden, etwa unter der Voraussetzung, daß von einer gewissen Höhe ab Diffusionsgleichgewicht besteht. Ist die Methode streng richtig, so muß sich unter den richtigen Voraussetzungen über  $M$  und  $T$  nach beiden Verfahren die gleiche Dichte ergeben. Findet man andererseits wesentlich verschiedene Werte auf beiden Wegen, so ist die Voraussetzung falsch. Insbesondere kann die Richtung der beiden berechneten Kurven wertvolle Anhaltspunkte für die Güte des Ergebnisses liefern. Wir wollen nun im folgenden drei Gruppen von Annahmen betrachten: a) Atmosphäre mit Wasserstoff und Helium, b) Wasserstoff spielt keine wesentliche Rolle, c) weder Helium noch Wasserstoff in merklichen Mengen vorhanden. In allen drei Fällen sind in den entsprechenden Figuren 1—3 die Kurven, die aus der Zusammensetzung der Atmosphäre allein berechnet sind, ausgezogen, dagegen die nach Gleichung (1) berechneten gestrichelt. Unter gleichen Voraussetzungen über  $M$  und  $T$  berechnete Kurven tragen gleiche Nummern.



a) Dichtekurven unter der Voraussetzung, daß sowohl Helium wie Wasserstoff in Diffusionsgleichgewicht vorhanden sind. In der Höhe sind dann Temperaturen wesentlich über  $300^{\circ}$  abs. nicht möglich, da sonst nach den oben erwähnten Rechnungen von JEANS der Wasserstoff in den Weltraum strömt. Ist dagegen die Atmosphäre kalt, so haben wir schon unter 100 km Höhe fast reinen Wasserstoff. Fig. 1 zeigt, daß für die kalten Stratosphären die Kurvenpaare entsprechend einem Wasserstoffgehalt, wie wir ihn etwa den Beobachtungen nach erwarten müssen (1 und 2) erheblich auseinander

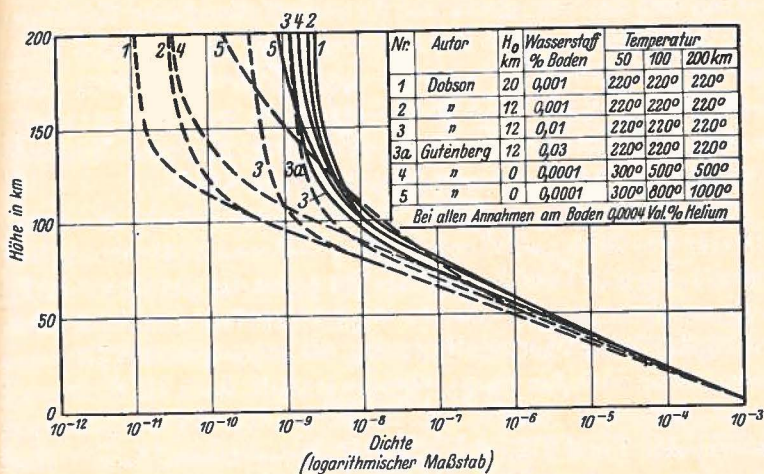


Fig. 1. Dichte der Atmosphäre in verschiedenen Höhen unter den Voraussetzungen der Tabelle. Die ausgezogenen Kurven sind unter der Annahme berechnet, daß von der Höhe  $H_0$  (s. Tabelle) ab Diffusionsgleichgewicht besteht, die gestrichelten Kurven nach Gleichung (1) auf Grund von Beobachtungen an Meteoriten.

liegen, so daß die Voraussetzungen mit erheblicher Wahrscheinlichkeit falsch sind; völlig unmöglich wäre es allerdings nicht, daß selbst eine solche Differenz durch die Voraussetzungen der Methode bedingt ist. Geht man nun mit dem Wasserstoffgehalt am Boden zu größeren Werten, wie sie allerdings mit den Beobachtungen kaum verträglich sind, so wird die Übereinstimmung besser (Kurvenpaar 3), und man kann es sogar fast erreichen, daß die nach beiden Methoden berechneten Kurven bis auf eine kleine Richtungsabweichung zwischen 100 und 125 km Höhe zusammenfallen (Kurve 3a gestrichelt und 3 ausgezogen), wenn man etwa  $\frac{1}{3}\%$  Wasserstoff bei einer Stratosphärentemperatur von  $220^{\circ}$  voraussetzt. Aber ein so hoher Wasserstoffgehalt am Boden übersteigt

weit das, was man wirklich beobachtet; dann ergibt sich aber auch in diesem Falle schon von etwas unter 100 km Höhe eine praktisch reine Wasserstoffatmosphäre, was dem Polarlichtspektrum widerspricht. Geht man andererseits zu hohen Stratosphärentemperaturen über (Kurven 4 und 5), so erhält man zwar genügend Stickstoff in Höhen von etwa 100 km, aber einerseits stimmen nun die Kurvenpaare gar nicht mehr zu einander (Kurven 4 und 5), andererseits ist, wie erwähnt, nach den Untersuchungen von JEANS eine heiße Wasserstoffatmosphäre nicht möglich.

Fassen wir also das Ergebnis der Betrachtung von Fig. 1 zusammen, so sehen wir, daß nur eine kalte Wasserstoffatmosphäre Kurvenpaare liefern kann, die innerhalb der zu erwartenden Fehlergrenzen übereinstimmen, daß man aber zu einer guten Übereinstimmung derartig hohen Wasserstoffgehalt am Boden annehmen muß, daß er einerseits den Beobachtungen widerspricht, andererseits die reine Wasserstoffatmosphäre in viel zu geringer Höhe beginnen würde.

b) Wasserstoff in allen Höhen unmerklich, Heliumgehalt mit der Höhe wachsend entsprechend Diffusionsgleichgewicht. Für eine kalte Atmosphäre gilt genau das gleiche wie im Falle des Wasserstoffes, nur daß hier die Möglichkeit eines wesentlich höheren Heliumgehaltes, welcher eine Näherung der entsprechenden Kurven bewirken würde, nach den Beobachtungen entfällt. Auch die Richtung der zusammengehörigen Kurven ist im Falle einer kalten Atmosphäre (Kurvenpaare 1 und 2 der Fig. 2) merklich verschieden. Bessere Ergebnisse erhält man für warme Helumatmosphären. Die beiden Kurven 4 fallen praktisch zusammen. Die Richtungsänderung beim Übergang von dem Kurvenpaar 3 zu 4 ist dadurch bedingt, daß gleichzeitig der Heliumgehalt ab- und der Stickstoffgehalt zunimmt. Die Kurven 5 entsprechen praktisch fast reinem Stickstoff. Tab. 2 mag zur Illustrierung dienen.

Tabelle 2.

Nr. der Kurve (Fig. 2)	Heliumgehalt % in Höhe			Stickstoffgehalt % in Höhe		
	100	150	200 km	100	150	200 km
3	23	94	100	74	6	0
4	10	43	77	86	55	23
5	5	8	14	90	88	82

Fig. 2 zeigt also, daß weder eine sehr kalte noch eine sehr warme Atmosphäre gute Übereinstimmung der Kurven ergibt, wenn man annimmt, daß Wasserstoff fehlt und Helium im Diffusionsgleichgewicht ist. Überdies müßte im Falle der Kurven 4 und 5 Helium bereits in den



Weltraum ausströmen, während im Falle der Kurven 3 die Grenze noch nicht erreicht ist. In diesem Falle ergibt sich aber schon bald über 100 km Höhe ein vermutlich zu kleiner Stickstoffgehalt; in etwas über 150 km Höhe würde Stickstoff praktisch fehlen, was wieder den Polarlichtbeobachtungen widerspricht. Immerhin sehen wir, daß sich im Falle der Kurven 4 sehr gute Übereinstimmung ergibt, was wir vielleicht so deuten können, daß die Atmosphäre im wesentlichen aus Stickstoff besteht,

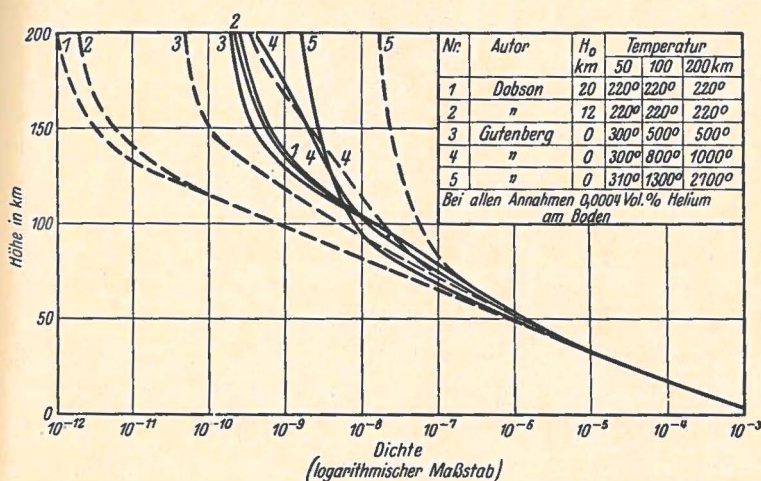


Fig. 2. Dichte wie in Figur 1, jedoch unter der Voraussetzung, daß Wasserstoff in der Atmosphäre fehlt.

daß jedoch in größerer Höhe auch ein gewisser Anteil von leichteren Gasen vorhanden ist. Dabei können wir an Wasserdampf denken, wie oben erwähnt wurde, es kann aber auch Helium vorhanden sein, wenn entgegen der Annahme von PETERSEN kein zeitlicher Gleichgewichtszustand besteht, sondern am Boden mehr Helium erzeugt wird, als oben wegströmt.

c) Fast reine Stickstoffatmosphäre (Fig. 3). Man erkennt, daß nur im Falle einer sehr heißen Stickstoffatmosphäre (Kurve 3) die Richtung der Kurven übereinstimmt, doch liegen sie dann um einen Faktor 10 auseinander. Dies könnte zwar sehr wohl eine Folge der Methode sein; es ist aber andererseits fraglich, ob wirklich nachts derartig hohe Temperaturen in den oberen Stratosphärenschichten vorhanden sind.

Das Gesamtergebnis, das wir aus den Figuren gemeinsam mit den übrigen eingangs erwähnten Ergebnissen ziehen müssen, lautet also: Die beste Übereinstimmung zwischen den Dichtewerten, die wir einerseits aus der Zusammensetzung der Atmosphäre und andererseits unter



Verwendung der Beobachtungen an Meteoriten finden, ergibt sich unter auch sonst wahrscheinlichen Annahmen dann, wenn die höheren Stratosphärenschichten im wesentlichen aus Stickstoff be-

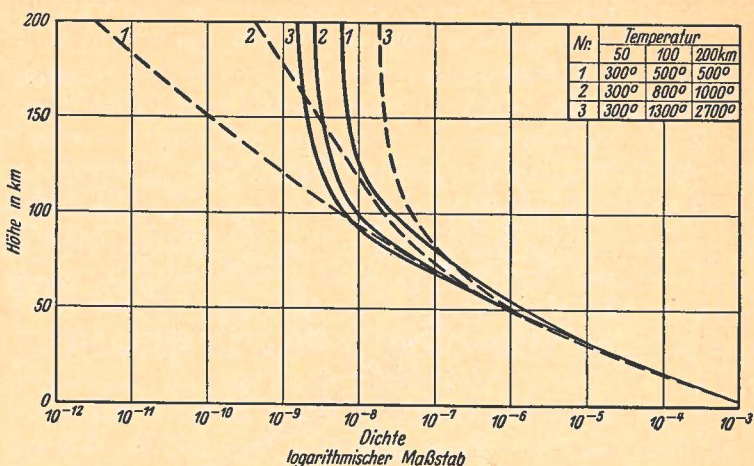


Fig. 3. Dichte wie in Figur 1, jedoch für eine Atmosphäre ohne Wasserstoff und Helium. Die Kurven gelten angenähert auch für eine völlig durchmischte Atmosphäre.

stehen, dem, mit der Höhe etwas abnehmend, Sauerstoff und, mit der Höhe langsam zunehmend, ein leichteres Gas (Helium? Wasserdampf?) beigemischt ist, und wenn gleichzeitig die Temperatur dort von der Größenordnung 500–1000° angenommen wird.

#### Literatur:

1. Eine eingehende Darstellung erfolgt in Kürze in Band 9 des Handbuches der Geophysik. Verlag Gebr. Bornträger, Berlin.
2. Proc. Roy. Soc. London Ser. A 1922, Vol. 102, p. 411. — RADA KOVIC, M. hat eine ausführliche kritische Darstellung gegeben: Meteorolog. Zeitschr. 1926, Bd. 43, S. 441.
3. GOWAN, E. H. Proc. Roy. Soc. London Ser. A, 1928, Vol. 120, p. 655, und 1930, Vol. 128, p. 531. Über das Ozonproblem selbst vergl. z. B. diese Zeitschr. 1929, Bd. 24.
4. STÖRMER, C. Zeitschr. f. Geophysik 1929, Bd. 5, S. 177 u. a.
5. Terr. Magnetism and Atm. Electricity 1928, Vol. 33, p. 233, and 1929, Vol. 34, p. 45.
6. Vorl. Mitt. in Phys. Review (2) 1929, Bd. 33, S. 269. Ausführliche Darstellung im gleichen Heft dieser Zeitschrift.
7. Physikal. Zeitschr. 1928, Bd. 29, S. 879.
8. Dynamische Theorie der Gase. Fr. Vieweg, Braunschweig 1926.